

Bericht über die physikalisch-geographischen Untersuchungen an den Lunzer Seen.

(Vortrag, gehalten vor der 85. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte zu Wien, 23. September 1913.)

Von

Dr. **Gustav Götzing** (Wien).

Die mir ursprünglich von seiten der Direktion der Biologischen Station Lunz gestellte Aufgabe, die Hydrographie der Seen zu bearbeiten, erweiterte ich im Einverständnis mit der Direktion der Biologischen Station zur Gesamtdarstellung der physikalisch-geographischen Verhältnisse nicht nur der Seen, sondern auch des gesamten Einzugsgebietes der Seen.

Das Beobachtungsmaterial zerfällt in zwei Gruppen; erstens in die von mir selbst angestellten Beobachtungen, z. B.: die geomorphologischen und hydrographischen und zweitens in die Gruppe, welche in der Sammlung von Beobachtungen besteht, welche die Leitung der Biologischen Station selbst zielbewußt organisierte, z. B.: die täglichen Temperaturmessungen des Seebaches, der Oberfläche des Untersees, meteorologische Beobachtungen, u. dgl.

Die von mir speziell angestellten Beobachtungen und Aufnahmen sind folgende:

1. kartographische, an den Seen und in deren Einzugsgebiet;
2. geologische;
3. geomorphologische;
4. hydrographische.

Die Verarbeitung der kartographisch-geologisch-morphologischen Beobachtungen liegt in der ersten Hälfte des I. Bandes der Monographie der Lunzer Seen¹⁾ vor. Unter Hinweis auf diese Publikation kann hier

¹⁾ Geomorphologie der Lunzer Seen und ihres Gebietes. Suppl.-Heft der Intern. Revue d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr. 1912.

aus dem kartographisch-geologisch-morphologischen Abschnitt nur ein kurzes Resumé gegeben werden.

Was die kartographischen Aufnahmen der Seen und ihres Einzugsgebietes anbelangt, so wurde eine gänzlich neue Vermessung der Seen vorgenommen. Die Seekarten wurden in einem großen Maßstab herausgegeben: der Untersee (Areal 0,679 km²) 1:3000, der Mittersee (Areal 0,024 km²) 1:1000, der Obersee (Areal 0,081 km²) 1:1500.

Die Grundlage der Kartierung bestand bei allen drei Seen in:

1. der Triangulation zahlreicher Uferpunkte und Verknüpfung derselben mit gemessenen Basislinien und Fixpunkten des Gebietes;
2. Krokierung der Uferstrecken und Einpassung der Krokis zwischen die Triangulationspunkte;
3. Neulotungen.

Beim Obersee wurden sowohl der Umriss des alten Sees vor seiner Vermoorung, also die Grenzlinie des Moores gegen das felsige Gehänge, wie auch der Moorrand des jetzt kleiner werdenden Sees kartiert. Das Krokis des Moores war im Sommer nur mit großen Schwierigkeiten aufzunehmen, da der Rand des Moores schwimmt; daher wurde diese Arbeit zum größten Teil zur Zeit, als das Moor gefroren war, andererseits die Schneedecke noch keine solche Mächtigkeit aufwies, um die Grenze gegen den See zu verwischen, im November rasch erledigt.

Beim Mittersee wurde die Uferlinie des Hochwasser-, Mittel- und Niederwasserstandes aufgenommen, was große Unterschiede ergab.

Beim Untersee machte ich hingegen nur ein Krokis (bei ungefährem Nieder- bis Mittelwasserstand, + 10 cm am Pegel), da die Arealunterschiede infolge verschiedenen Wasserstandes hier geringe sind.

Die Neulotungen fanden entlang von verschiedenen Profilstrecken statt, da die Lunzer Seen zu den wenigen, noch nicht geloteten Seen der österreichischen Alpen gehörten; sie erfolgten beim Unter- und Obersee vom Eis aus, was sehr große Vorteile hat und exakte Resultate liefert, während am Mittersee die Lotung vom Boot aus vorgenommen werden mußte, weil dieser von Quell- und Grundwasser gespeiste See auch im strengsten Winter nicht vollständig zufriert.

Auf Grund der Lotungen wurden die Isobathen entworfen. So beim fast 34 m tiefen Untersee alle 5 m; zur Charakterisierung der Uferbänke wurde außerdem die 2 m Isobathe und zu der des Schotterdeltas die 1 m-Isobathe eingezeichnet. Beim 2,9 m tiefen Mittersee verwendeten wir zur besseren Darstellung der zahlreichen (140) Quelltrichter $\frac{1}{2}$ m-Isobathen, beim 15,5 m tiefen Obersee neben den 5 m-Isobathen

noch die 2 m-Linie zur Abgrenzung der Uferbänke. Die Lotungen sind hinreichend dicht; es entfallen am:

	Areal in km ²	Zahl der Lotungen	Zahl der Lotpunkte auf 1 km ² berechnet
Untersee	0,679	306	451
Mittersee	0,0236	196	8312
Obersee	0,0807	161	1996

Die fertigen Seekarten gaben den Vorwurf für die morphometrische Auswertung, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Bemerkte sei noch, daß die k. k. hydrographische Landesabteilung in Wien ein Präzisionsnivellement der drei Seen durchführte.

Neben der Aufnahme der Seen ging eine Reambulierung der Originalaufnahme des k. und k. militärgeographischen Institutes des Gebietes 1:25000; sie unterscheidet sich von letzterer durch die richtige Einpassung der Areale der Seen, eine genauere Aufnahme der komplizierten hydrographischen Verhältnisse (insbesondere des Seebaches bis zu seiner Mündung in den Untersee), Korrektur der Hydrographie überhaupt, Einzeichnung zahlreicher biologisch hochinteressanter Almtümpel, Korrektur der Zeichnung des Geländes, insbesondere der Wandbildungen des Gebietes, Ergänzungen und Berichtigungen in der Nomenklatur und endlich durch die teilweise Evidenzhaltung von Kommunikationen und Siedlungen.

Trotz Alexander Bittners ausgezeichnete Aufnahme haben die geologischen Untersuchungen, die Grundlage für die geomorphologischen Arbeiten, noch neue Resultate geliefert, insbesondere über die Verbreitung des Lias und über die tektonischen Verhältnisse, wobei insbesondere die Störungen im Gebiete des Hetzkogels, der Faltenbau des Dürrensteinstockes der Klärung näher geführt wurden, und im Seebachtal eine Querstörung konstatiert wurde. Für die Morphologie sind aber diese Störungen von keinerlei Bedeutung, da das charakteristische der Oberflächengestalt des Dürrensteinstockes eine mehrfach undulierte Verebnungsfläche mit aufgesetzten Kuppen ist, eine alte Kuppenlandschaft, in welche die jungen Tieftäler eingeschnitten sind. Die alte Kuppenlandschaft, die sich fast durchaus an den Dachsteinkalk anknüpft, fasse ich als altmiozän auf und es konnten an mehreren Stellen Quarzgeschiebe gefunden werden, die ein Analogon zu den bekannten Augensteinen der Alpen bilden, die ich als alte Schotter von Flüssen deute, die aus den Zentralalpen über die Kalkalpen hinweggeflossen sind.

Während die Plateauformen vor allem durch Verkarstung, die auch zahlreiche hydrographische Eigentümlichkeiten in unserem Gebiete her-

vorbringt, modifiziert sind, sind die vor allem obermizän und pliozän eingetieften Täler durch Glazialerosion umgestaltet worden, die einen ausgezeichneten Stufenbau besonders im Seebachtal hervorrief. An die Glazialerosion knüpft größtenteils die Entstehung der Seen, und zwar ist der Obersee ein Karsee, der Untersee gleichfalls eine Felswanne, geknüpft an das Ausstreichen der weichen Lunzer Schichten und Reiflinger Kalke und gestaut durch eine Rippe harten Opponitzer Kalkes; der Mittersee verdankt seine Entstehung dagegen nur zum Teil der Glazialerosion, sondern vor allem der Aufdämmung durch Schutt und sekundär durch einen künstlichen Damm.

Nur kurz einiges über die Morphologie der Seen.

Am interessantesten ist der Mittersee, da an seinem Boden in 140 Quelltrichtern das Grundwasser hervortritt, wodurch dieser See einen in den Alpen einzigartigen Typus darbietet. Die Trichter sind veränderlich; es entstehen immer neue und alte verrutschen und verstürzen. Der Obersee zerfällt in vier Becken, die durch Schlamm bedeckte Schwellen voneinander getrennt sind. Im Moor südlich vom Obersee ist außerdem ein 6 m tiefes Becken ausgepart.

Ein besonderes Studienobjekt der Morphologie der Seen war deren Verlandung und Sedimentierung. Der Untersee verlandet vor allem durch den Zufluß, der Obersee vegetativ, durch Moorwachstum.

Die Art und Weise der Sedimentierung wurde beim Unter- und Obersee analysiert und ich habe wohl zum erstenmal den Versuch gemacht, Bodenfazieskarten der Seen zu entwerfen, auf denen die Sedimente nach ihrem Ursprung, nach Korngröße, petrographischen, geologischen und biologischen Gesichtspunkten unterschieden wurden. Besonders beim Untersee ist der Gegensatz zwischen den Sedimenten, die durch den Einfluß in den See gebracht werden und den Sedimenten des Sees selbst, ein großer. Die letzteren können in litorale und pelagische unterschieden werden. Das pelagische Sediment ist der sogenannte Schwebschlamm, während das litorale Sediment aus zoo- und phyto-genen Schlamm- und Sandmassen besteht. Tiere (besonders Schnecken) und Pflanzen beteiligen sich im hohen Maße an der Bildung der Uferbänke und des oberen Teiles der Seehalde. Die Uferbank ist also nicht das Ergebnis der Abrasion im Sinne von F. A. Forels Theorie, sondern organogen und wird erst durch die Wellentätigkeit eingeebnet. Wichtig ist die Tatsache, daß die Uferbänke am Nord- und Südufer die gleiche geologische und chemische Zusammensetzung haben, trotzdem die Gesteine des Ufers ganz verschiedene sind. (Am Nordufer Lunzer Sandstein und Schiefer, am Südufer Reiflinger Kalk.) Wären

sie aus dem Zerreibsel der Ufergesteine entstanden, so müßten sie am Nord- und Südufer verschiedene Zusammensetzung haben. Die chemischen Analysen des Schlammes von Dr. Mulley lieferten Bestätigungen des großen Unterschiedes zwischen dem SiO_2 reichen und kalkarmen Schweschlamm und dem kalkreichen und SiO_2 armen Uferbankschlamm.

Gut geglückte Messungen mittels Schlammkasten nach der Methode von Albert Heim haben uns in die Lage versetzt, die jährlichen und jahreszeitlichen verschiedenen Beträge, sowie die regionalen Unterschiede in der Sedimentierung festzustellen. So zeigte sich z. B., daß die Sedimentierung vor allem im Frühjahr und im Sommer stattfindet, daß sie dann viermal größer ist als im Winter und daß nahe dem Einfluß etwa der vierfache Betrag der Menge des Schlammes der Seemitte sich niederschlägt. Auch am Obersee ist das litorale Sediment der Uferbank und des oberen Teiles der Seehalde zoo- und phytogen, das pelagische ein roter, sehr eisenreicher, zäher Schlamm, der im Gegensatz zum litoral organogenen Sediment als vorwiegend chemisches bezeichnet werden kann.

Die hydrographischen Beobachtungen zerfielen in: hydrometrische der Seezuflüsse und Ausflüsse mittels des hydrometrischen Flügels, Hand in Hand mit Aufzeichnungen des Wasserstandes im Seebach, Kanal und am Untersee (Seereit), thermometrische der Seezuflüsse und der Seen und zwar in den Seen mittels Schöpfflaschen, optische (vorzüglich über die Durchsichtigkeit) und in Beobachtungen über Strömungen und schließlich Vereisung. Das eigene Beobachtungsmaterial ist ein außerordentlich großes und wird noch vermehrt durch die Organisation von systematischen, täglichen hydrographischen Beobachtungen von seiten der Biologischen Station.

So werden dort noch bis heute tägliche Beobachtungen gemacht: am Untersee neben den meteorologischen Beobachtungen und den Wasserstandsnotierungen über die Temperatur des Einflusses und der Seeoberfläche im dritten Querprofil; ferner ist ein Thermograph an der Bootshütte am See angebracht, der die Lufttemperaturen registriert; ein zweiter Thermograph war eine Zeitlang zugleich am Obersee, wo übrigens auch monatlich einmal Temperaturlotungen gemacht werden. — Ein Beobachter liest ferner täglich den Pegelstand des Ausflusses des Untersees ab. Eine Zeitlang wurden auch tägliche Wasserstandsbeobachtungen nahe dem Seende beim Seereit gemacht. Derselbe Beobachter hat auch drei Winter hindurch das Profil des Eises gemessen, um Aufschlüsse über die Eisdecke und Eisbeschaffenheit zu erhalten.

Es seien aus dem hydrographischen Material nur wenige Ergebnisse herausgegriffen, die sich auf das Problem der Wassererneuerung beziehen, auf Grund der Temperaturbeobachtungen, Sauerstoffanalysen und der Bestimmungen der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers.

Im Frühjahr erfolgt eine Wassererneuerung infolge Zirkulationströmungen durch Wind, die durch gleichmäßige Temperatur- und Dichteverteilung bedingt sind, von der Oberfläche bis zum Grund, so daß die 4⁰-Wasserschicht in der Tiefe bald verschwindet und z. B. im Jahre 1912 binnen drei Wochen eine Temperaturerhöhung um 1½⁰ in der Tiefe eintrat. Das wird auch bestätigt durch Dr. Ruttners Bestimmungen der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers des Sees und des Seebaches. Die im Winter noch hohe Konzentration des Seewassers wird im Frühjahr insbesondere infolge Schneeschmelze bedeutend verringert und es erfolgt eine starke Verdünnung oder Aussüßung, wenn man dies so nennen will, in den oberen und mittleren Schichten bis 20 m Tiefe vollständig, die Folge tiefreichender Zirkulationsströmungen durch Wind. Dagegen ist im Sommer die Wassererneuerung eine trägere; schon wegen der Entwicklung der Sprungschicht können bei Windströmungen die Oberflächenschichten nicht mit den Tiefenschichten vermischt werden, weil die Temperatur und Dichtedifferenzen zu große sind. Es kommt daher nur in den Partien oberhalb der Sprungschicht zu einer langsamen Wassererneuerung durch Windströmungen. Die Wassererneuerung in der Tiefe unter 15 m geht durch den Seebach sehr langsam vor sich, wie die langsame Temperaturerhöhung und vor allem wie die ziemlich gleichbleibende Konzentration des Tiefenwassers lehrt. Die herbstliche Konvektion dagegen führt zur Zerstörung der Sprungschicht und damit zu einer raschen Wassererneuerung von der Oberfläche bis zum Grund. Das Wasser hat dann überall die gleiche Leitfähigkeit, die gleiche Dichte und Temperatur und infolgedessen können auch die Windströmungen bis zum Grunde reichen, so daß eine vollständige Durchmischung der Wasserschichten eintritt.

Die Sauerstoffanalysen bestätigen dieses Bild der Wassererneuerung.

Im Untersee haben wir im Winter relativ wenig Sauerstoff in der Tiefe; im Frühjahr steigt der Sauerstoffgehalt in der Tiefe plötzlich, jedenfalls durch den Seebachzufluß und vornehmlich durch die tiefreichenden Zirkulationsströmungen (vgl. die nebenstehende Tabelle).

Im Sommer nimmt in der Tiefe der Sauerstoffgehalt durchaus ab und zwar mehr in der Tiefe; das Maximum finden wir im Sommer (1913) in 5 bis 10 m Tiefe, so daß jedenfalls hauptsächlich in dieser

Messungen im Untersee 1913:

Tiefe	Sauerstoff mg in 1 Liter		
	24. II.	17. IV.	12. VIII.
0	—	11,6	10,2
1	12,0	—	—
5	11,9	11,7	10,5
10	11,3	11,5	10,3
15	11,0	11,5	10,2
20	10,9	11,3	9,8
25	10,4	10,6	8,7
30	6,6*	9,8	7,9

Schicht sich der Seebach mit dem Seewasser mischen dürfte. Im Herbst erfolgt eine bedeutende Sauerstoffzunahme bis zum Grund infolge vertikaler Konvektion.

Ähnlich ist das Verhalten des Obersees, nur sind hier die Unterschiede zwischen Sauerstoffmaximum und -Minimum noch größer. Der See hat keinen starken Einfluß und daher kann das Wasser in den mittleren und Tiefenschichten nicht recht durch Einflußströmungen erneuert werden. Dazu kommt, daß das Wasser infolge starker Trübung durch flockige Humussubstanzen oberflächlich bei der mit der Meereshöhe zudem wachsenden Insolationswirkung sehr stark erwärmt wird, die Sprungschicht im Vergleich zum Untersee seichter, aber viel prägnanter wird, so daß infolge der großen Temperatur- und Dichtedifferenzen zwischen dem Oberflächen- und Tiefenwasser Windströmungen bis zum Grund ausgeschlossen sind. Dies lehren auch Sauerstoffanalysen:

Obersee 1911—1912:

Tiefe	Sauerstoff mg in 1 Liter				
	28. IX. 1911	16. X. 1911	3. I. 1912	20. IV. 1912	19. VIII. 1912
0	—	9,6	—	—	8,0
1	—	9,7	—	—	—
2	—	—	6,7	7,5	—
3	—	9,6	—	—	7,9
5	6,6	9,0	5,7	2,0*	5,7
7	5,1	—	—	—	1,7
10	0,1*	4,8	4,8	0,8*	0,2
14 Grund	—	0,05	3,6	0,1*	0,4

Anfang Januar 1912 hatte das Tiefenwasser (10 m bis Grund) noch 3,6 bis 4,8 mg in 1 Liter, welcher Betrag sich unter der Eisdecke in-

folge Stagnation des Wassers und Verbrauchs des Sauerstoffs durch Eisenoxydulverbindungen auf 0,1 minderte und der Verbrauch schreitet, weil die Eisdecke bei umgekehrter Temperaturschichtung Wassermischungen mit den oberen sauerstoffreicheren Partien ausschließt, bis zu 5 m Tiefe hinauf fort (20. IV.).

Am 19. VIII. 1912 zeigte sich in der Tiefe nur eine unbedeutende Zunahme, so daß mit dem Aufgehen des Sees und der Schneeschmelze im Mai hier nicht diese starke Erneuerung der Tiefenschichten stattfindet wie am Untersee, ja in der Tiefe von 10 m ist sogar der Sauerstoffverbrauch weiter vorgeschritten. Der geringe Sauerstoffgehalt noch in 7 m Tiefe beweist, daß im Sommer die Schichten unterhalb der Sprungschicht (etwa 5 m) mit dem sauerstoffreichen warmen Wasser oberhalb 5 m nicht eine Mischung eingehen, weil eine solche die hohe Temperatur und geringe Dichte des oberen Wassers verhindern. Der Sauerstoffverbrauch kann weiter schreiten (vgl. 28. IX. 1911 in 10 m Tiefe), während indessen von oben her durch die vertikale Konvektion im Herbst die Sauerstoffzufuhr auch in die Partien unterhalb der Sprungschicht einsetzt, um schließlich allmählich den Grund zu erreichen, wie die Reihe 28. IX. 1911 bis 3. I. 1912 sehr schön erkennen läßt. Kurz vor Beginn der Vereisung wird in der Tiefe das Sauerstoffmaximum zu erwarten sein, da damit die vertikalen Konvektionsströmungen am tiefsten gehen, um mit der Vereisung des Sees ihr Ende zu erreichen. Auch Beobachtungen in anderen Jahren (Beobachter Mulley, Wittmann, Ruttner) ergaben wiederholt den vollständigen Verbrauch des Sauerstoffes unterhalb 10 m Tiefe.

Die rascheste und regelmäßigste Wassererneuerung hat der Mittersee, da die ihn speisenden Quellen im allgemeinen das ganze Jahr fließen, der Ausfluß relativ groß und die Tiefe gering ist. Je nach dem Funktionieren der Quellen ist aber die Erneuerung verschieden rasch. Erfolgt sie bei hohem Grundwasserstand binnen wenigen Stunden, geht sie bei niedrigem Grundwasser- und damit Pegelstand viel langsamer vor sich.

Thermisch zerfällt der See in zwei Gebiete:

1. in das Gebiet der aktiven Quelltrichter mit geringen täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen (jährlich höchstens 3°) und mit rascher Wassererneuerung und

2. in das Gebiet der außer Funktion geratenen Quelltrichter und der flachen trichterlosen Seepartien mit großen Temperaturschwankungen im Tag und im Jahr. Diese letztere Region entspricht daher dem

Litoral von anderen großen und tiefen Seen. Der Mittersee erhält seine Thermik vor allem durch die Quellen aufgedrückt und zwar bei Hochwasser, vermehrtem Grundwasserstand vollständig, bei Niedrigwasser, verringertem Grundwasserstand nur teilweise. Die Temperatur der Quellen schwankt im Jahre zwischen etwa 5 bis 7°, höchstens 8°. Die niedrigste Temperatur registrieren wir im April und Mai infolge Schneeschmelze. Der See ist als typischer Quellsee also im Winter warm, im Sommer kalt.

Die Thermik der beiden anderen Seen ist mit der Entwicklung der Strömungen, der herbstlichen Konvektionsströmungen, der Einstömungen der Zuflüsse und der je nach Temperaturschichtung verschieden tief reichenden Windströmungen innig verknüpft. Darauf kann hier nicht eingegangen werden; die Verarbeitung des thermometrischen Materials erscheint im Teil B der erwähnten Monographie. Es sei hier nur bemerkt, daß neben den jahreszeitlichen Temperaturunterschieden die regionalen und täglichen Temperaturunterschiede sowohl in der pelagischen wie litoralen Region der Seen studiert wurden.

Das Studium der Vereisung der Seen lehrte bemerkenswerte, bisher fast gar nicht beachtete Einzelercheinungen. Das Eisprofil im Untersee weist eine gesetzmäßige Entwicklung auf. Zunächst entsteht Wassereis (Kerneis); fällt darüber Schnee, so wird infolge der Last desselben das Seewasser zwischen den Spalten aufgepreßt und es entsteht ein Schnee- und Eisbrei. Der obere Teil dieses Schnee- und Eisbreies gefriert zu Schneeis über dem mit Wasser durchtränkten Schnee und es kann durch weitere Angliederungen von Schneeis mit dazwischen liegenden Wasserschichten das Eis nach oben wachsen, während das Kerneis durch das Seewasser unterschmolzen wird. Ist das Kerneis infolge Unterschmelzung verschwunden, so können die wenig resistenten Schnee- und Eis-schichten dann im Frühjahr leichter zerstört werden (durch Wind, warme Einflüsse und Sonne).

Am Obersee ist infolge der großen Schneefälle (Schneehöhen bis über drei Meter) die Schneemächtigkeit mit den eingeschalteten Wasserschichten eine außerordentlich große (Mächtigkeiten bis 1,8 m). Interessant ist die lange Dauer des Abschlusses des Sees durch die Eisdecke von Mitte November bis Mitte Mai, während die Eisperiode beim Untersee vom Ende Dezember bis Anfang April währt. Es kann die Dauer der Eisperiode als lokalklimatologisches Element bezeichnet werden und es würde der Obersee trotz seiner Meereshöhe von nur 1113 m Schweizer Alpenseen in Höhenlagen von 1800 m (z. B. Rhätikon-

seen) entsprechen, über deren Vereisung uns besonders F. Zschokke¹⁾ unterrichtete.

Am Mittersee erfolgt die Vereisung unregelmäßig je nach dem Funktionieren der im Winter warmen Quelltrichter, die auch bei starkem Frost von -30° eisfrei blieben. Im Litoral und im Bereiche der schwach funktionierenden Quellen kommt es natürlich zur Eisbildung. Man kann selten von einer durch den Winter permanenten Eisdecke sprechen, da durch stärkeres Funktionieren der Quellen bei Hochwasser und Tauwetter das Eis während des Winters mehrmals zerstört wird, um wieder aufs neue zu entstehen, wobei aber Jahr für Jahr fast immer die gleichen Umrisse im Vereisungsbild wiederkehren.

¹⁾ Die Tierwelt der Hochgebirgsseen, 1900.